

# 変動軸力と曲げを受けるアンカーボルト 多数配列型露出柱脚の復元力特性モデル

高松 隆夫\* · 玉井 宏章\* · 山西 央朗\*\* · 松村 高良\*\*\*

(平成20年10月31日受理)

## Models of Restoring Force Characteristics of Exposed Column-Base with Multi-Rows of Anchor Bolts under Variable-Axial Force and Bending

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Teruaki YAMANISHI and Takayoshi MATSUMURA

(Received Oct. 31, 2008)

### Abstract

Experimental studies were carried out on anchor-bolt-yield-type exposed column bases subjected to constant compression or tension to obtain different types of resistant mechanisms and restoring force characteristics due to a magnitude of the constant axial force. In this paper, models of resistant mechanisms and restoring force characteristics are proposed on exposed column bases subjected to a variable axial force by use of the experimental results and the models of restoring force characteristics under constant axial forces.

**Key Word:** exposed column-base, models of restoring force characteristics, variable-axial force

### 1. 序論

露出柱脚の一般的な崩壊機構は、アンカーボルトが降伏するものであり、その復元力特性がスリップ型となることはよく知られている。

著者等は、アンカーボルト降伏型露出柱脚の載荷試験、および解析的研究により、以下の2つの特性を明らかにしている。

- 1) アンカーボルトに塑性伸びが発生することにより、スリップ現象が発生し、柱脚の固定度が著しく劣化する。
- 2) 構造物の自重等の、柱圧縮軸力は、柱脚の曲げ抵抗、および抵抗機構に支配的な影響を与える。

ところが、実際の構造物では、地震外力作用時には、中

柱(構造物の内部に配置されている柱)の柱脚においては、ほぼ一定の圧縮軸力が作用すると考えられるが、側柱(構造物の外周に配置されている柱)の柱脚のように、建物の塔状比が比較的高く、大きな転倒モーメントが作用する場合や、ブレース引張力が作用する場合には、柱脚部分に作用する柱の圧縮軸力の減少や引張軸力の発生など、変動軸力を考慮しなければならない。柱軸力が変動した場合でも、圧縮軸力の領域であれば一定圧縮軸力のモデルにより求められることが報告されている。

著者等も、これまでに一定圧縮・引張軸力作用下における載荷実験、およびアンカーボルトを2列配置した場合の露出柱脚の変動軸力作用下における載荷実験を行い、一定圧縮・引張軸力作用下における抵抗機構を示すと共に、降

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 広島工業大学大学院工学研究科知的機能科学専攻

\*\*\* 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

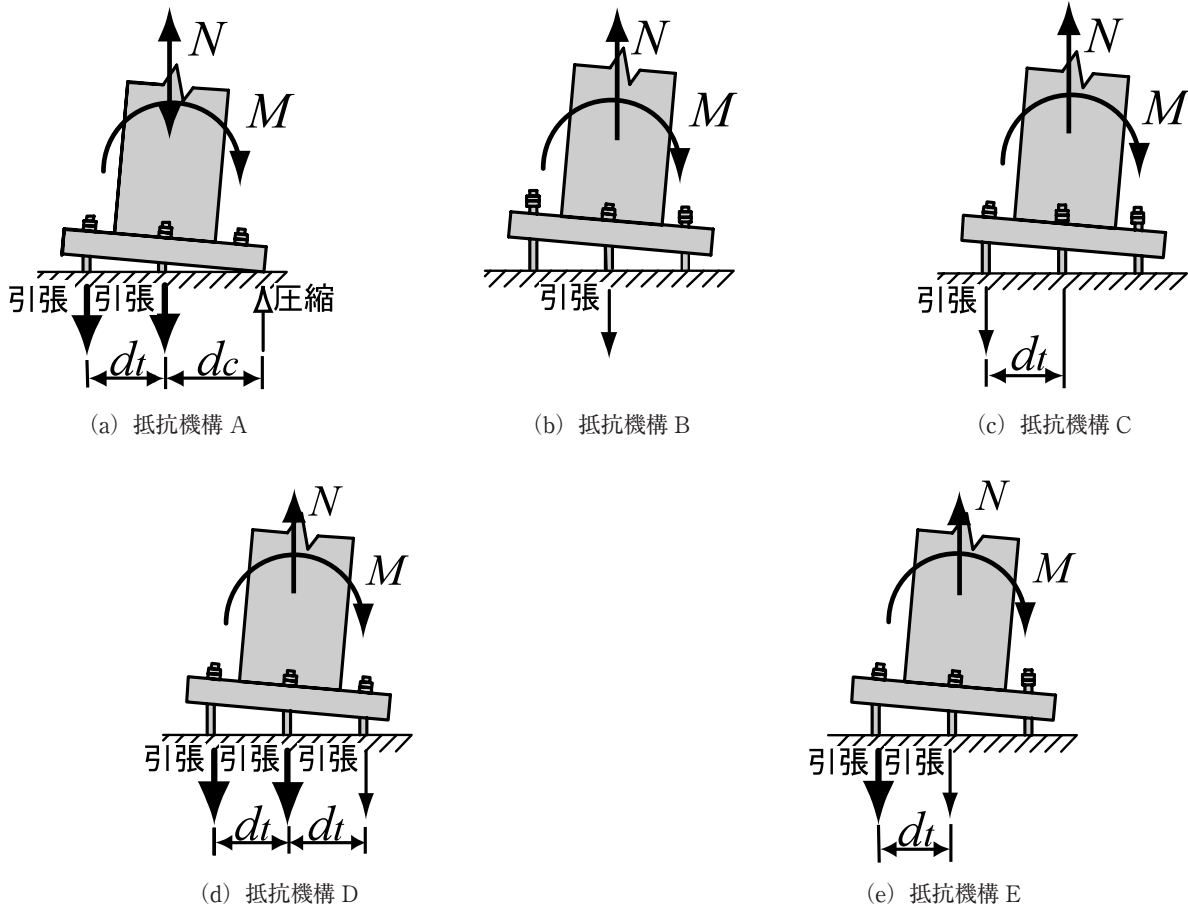


図1 抵抗機構

伏耐力，弾性剛性の評価式，および復元力特性モデルの提案を行い，実験結果との比較を行っている。

しかしながら，露出柱脚では，アンカーボルトを多数配列する場合もあり，多数配列型の変動軸力作用下における抵抗性状の検討を行う必要がある。

本論文では，昨年行った多数配列型露出柱脚における一定圧縮・引張軸力作用下における荷重実験により提案した抵抗機構，および抵抗性状をもとに変動軸力作用下における多数配列型露出柱脚の抵抗性状を示すと共に復元力特性モデルの提案を行う。

## 2. 抵抗機構

本論文で提案する抵抗機構を図1に示す。

抵抗機構は，ベースプレートと基礎の接触・離間関係，およびアンカーボルトのナットとベースプレートの接触・離間関係より求めている。

また，本論文では，以下の仮定をもとに抵抗機構の提案を行う。

1. 柱脚の降伏要素を，アンカーボルトに限定する。
2. 露出柱脚の構成要素である基礎コンクリート，ベースプレートは弾性変形のみを許容し，塑性化しないもの

とする。そのため，柱脚の幾何学的変形状より求めるアンカーボルトの伸び量の評価の際に，基礎コンクリート，ならびにベースプレートの弾性変形を考慮するための係数：Rを導入する。

3. 圧縮合力点位置を圧縮側のベースプレート端部に設ける。

いかなる軸力作用下においても，ベースプレートと基礎コンクリートが接触している場合，圧縮合力点位置は推移しないものとする。

4. ベースプレートと基礎コンクリート接触時には，引張側アンカーボルトの抵抗力のみを考慮する。

処女荷重時には，圧縮側に位置するアンカーボルトも曲げに抵抗するが，引張側と比較して抵抗力・剛性が小さいため，また，繰り返し荷重下では，ベースプレートと接触し難くなるため，圧縮側は考慮しないものとする。

5. 柱せん断力は，ベースプレートと基礎接触時には，ベースプレートと基礎との間に発生する摩擦により抵抗し，離間時には，アンカーボルトのせん断力で抵抗するものとする。

ベースプレートと基礎の間には，通常，0.4以上の摩擦係数が期待できる。第1層の層せん断力に対して，柱

軸力は十分に大きいので、摩擦抵抗力で十分に抵抗できるとされている。

6. アンカーボルトの材料特性には、完全弾塑性体モデルを用いる。

### 1) 抵抗機構 A

抵抗機構 A を図 1(a) に示す。

抵抗機構 A は、ベースプレートと基礎とが接触している場合の抵抗機構である。この抵抗機構の場合、圧縮側ベースプレート端部と基礎との接触面を中心に、ベースプレートが回転するため、曲げ耐力は引張側、および中央列のアンカーボルトより求められる曲げ耐力、および軸力による曲げ耐力を累加することにより求めることができる。

以下に、引張側、中央列、および軸力による耐力  ${}_A M_\alpha$ 、 ${}_A M_\beta$ 、 ${}_A M_N$  と、この抵抗機構の曲げ耐力  ${}_A M_y$ 、および弾性剛性  ${}_A K_{BS}$  の評価式を示す。

$${}_A M_\alpha = n_\alpha \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot (d_c + d_t) \dots\dots\dots (1.a)$$

$${}_A M_\beta = n_\beta \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot d_c \dots\dots\dots (1.b)$$

$$\begin{aligned} {}_A M_y &= {}_A M_\alpha + {}_A M_\beta + {}_A M_N \\ &= n_\alpha \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot (d_c + d_t) + n_\beta \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot d_c + N \cdot d_c \dots\dots (1.c) \end{aligned}$$

$${}_A K_{BS} = \frac{{}_{ab} A \cdot E \cdot \{ n_\alpha \cdot (d_c + d_t)^2 + n_\beta \cdot d_c^2 \}}{{}_{ab} I \cdot R} \dots\dots\dots (1.d)$$

ここで、 $n_\alpha$  引張側アンカーボルト本数、 $n_\beta$  中央列アンカーボルト本数、 $A_{ab}$  アンカーボルト断面積、 $\sigma_y$  アンカーボルト降伏応力、 $d_c$  ベースプレート端部から柱図心位置までの距離、 $d_t$  アンカーボルト図心位置から柱図心位置までの距離、 $E$  アンカーボルトのヤング係数、 ${}_{ab} I$  アンカーボルト有効長さ、 $R$  低減係数である。

### 2) 抵抗機構 B

抵抗機構 B を図 1(b) に示す。

抵抗機構 B は、ベースプレートと基礎が離間し、中央列のみのアンカーボルトのナットとベースプレートが接触している場合の抵抗機構である。

この抵抗機構の場合、中央列のアンカーボルトのナットとベースプレートの接触面を中心にベースプレートが回転するため、アンカーボルトは柱軸力に対してのみ抵抗し、曲げに対しては抵抗しない。また、中央列のアンカーボルトと軸力との作用線が一致するため、軸力による曲げ耐力も発生しない。よって、この抵抗機構では、曲げ耐力は 0 であると考えられる。

### 3) 抵抗機構 C

抵抗機構 C を図 1(c) に示す。

抵抗機構 C は、ベースプレートと基礎が離間し、引張

側、もしくは圧縮側どちらかのアンカーボルトのナットとベースプレートが接触している場合の抵抗機構である。

この抵抗機構の場合、接触している側のアンカーボルトのナットとベースプレートとの接触面を中心にベースプレートが回転するため、アンカーボルトは柱軸力にのみ抵抗するため曲げに対しては抵抗しない。よって、この抵抗機構の曲げ耐力は、軸力による曲げ耐力により求めることができる。

以下に、この抵抗機構の曲げ耐力  ${}_C M$  の評価式を示す。

$${}_C M = N \cdot d_c \dots\dots\dots (2)$$

### 4) 抵抗機構 D

抵抗機構 D を図 1(d) に示す。

抵抗機構 D は、ベースプレートと基礎が離間し、全アンカーボルトのナットとベースプレートが接触している場合の抵抗機構である。

この抵抗機構の場合、圧縮側アンカーボルトのナットとベースプレートの接触面を中心としてベースプレートが回転するため、曲げ耐力は引張側、および中央列のアンカーボルトよりも求められる曲げ耐力、および軸力による曲げ耐力を累加することにより求められる。

以下に、引張側、中央列、および軸力による耐力  ${}_D M_\alpha$ 、 ${}_D M_\beta$ 、 ${}_D M_N$  と、この抵抗機構の曲げ耐力  ${}_D M_y$ 、および弾性剛性  ${}_D K_{BS}$  の評価式を示す。

$${}_D M_\alpha = n_\alpha \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot 2d_t \dots\dots\dots (3.a)$$

$${}_D M_\beta = n_\beta \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot d_t \dots\dots\dots (3.b)$$

$${}_D M_N = N \cdot d_t \dots\dots\dots (3.c)$$

$$\begin{aligned} {}_D M_y &= {}_D M_\alpha + {}_D M_\beta + {}_D M_N \\ &= n_\alpha \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot 2d_t + n_\beta \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot d_t + N \cdot d_t \dots\dots (3.d) \end{aligned}$$

$${}_D K_{BS} = \frac{{}_{ab} A \cdot E \cdot d_t^2 \cdot (4n_\alpha + n_\beta)}{{}_{ab} I} \dots\dots\dots (3.e)$$

### 5) 抵抗機構 E

抵抗機構 E を図 1(e) に示す。

抵抗機構 E は、ベースプレートと基礎が離間し、中央列と引張側、もしくは圧縮側のアンカーボルトのナットとベースプレートが接触している場合の抵抗機構である。

この抵抗機構の場合、中央列のアンカーボルトのナットとベースプレートの接触面を中心としてベースプレートが回転する場合と、圧縮側のアンカーボルトのナットとベースプレートの接触面を中心としてベースプレートが回転する場合の 2 種類が考えられる。

中央列のアンカーボルトとベースプレートの接触面を中

心としてベースプレートが回転する場合、中央列のアンカーボルトと軸力の作用線が一致しているため軸力による曲げ耐力は発生しない。よって、この場合の曲げ耐力は、引張側のアンカーボルトの曲げ耐力により求めることができる。

以下に、この場合の曲げ耐力  ${}_E M_{y1}$ 、および弾性剛性  ${}_E K_{BS1}$  を求める評価式を示す。

$${}_E M_{y1} = n_\alpha \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot d_t \quad \dots\dots\dots (4.a)$$

$${}_E K_{BS1} = \frac{n_\alpha \cdot A_{ab} \cdot E \cdot d_t^2}{R \cdot ab \cdot l} \quad \dots\dots\dots (4.b)$$

また、圧縮側のアンカーボルトのナットとベースプレートの接触面を中心としてベースプレートが回転する場合、曲げ耐力は、中央列のアンカーボルトより求められる曲げ耐力と軸力による曲げ耐力を累加することで求めることができる。

以下に、この場合の中央列、および軸力による曲げ耐力  ${}_E M_\beta$ 、 ${}_E M_N$  と、弾性剛性  ${}_E K_{BS}$  の評価式を示す。

$${}_E M_\beta = n_\beta \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot d_t \quad \dots\dots\dots (5.a)$$

$${}_E M_N = N \cdot d_t \quad \dots\dots\dots (5.b)$$

$$\begin{aligned} {}_E M_{y2} &= {}_E M_\alpha + {}_E M_N \\ &= n_\beta \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot d_t + N \cdot d_t \quad \dots\dots\dots (5.c) \end{aligned}$$

$${}_E K_{BS2} = \frac{n_\beta \cdot A_{ab} \cdot E \cdot d_t^2}{R \cdot ab \cdot l} \quad \dots\dots\dots (5.d)$$

### 3. 軸力

本論文で作用させる軸力と軸力領域の関係を図2に示す。軸力領域は、軸力に対してアンカーボルトのみで抵抗した場合、何列のアンカーボルトで抵抗できるかに着目し決定し、その結果をもとに軸力の変動率を決定している。

以下に、軸力領域と作用させる軸力を示す。また、軸力領域と軸力は、全アンカーボルトの総和  ${}_{ab} N_y$  を用いて示す。

#### 3.1 軸力領域

##### (1) 圧縮領域

圧縮領域は、圧縮軸力が作用する領域であり、軸力が0以下、つまり負になる領域 ( $N \leq 0$ ) である。

##### (2) 引張領域 I

引張領域 I は、アンカーボルト 1 列 (2 本、もしくは 3 本) で抵抗できる範囲 ( $0 < N < 0.25 {}_{ab} N_y$ ) である。

##### (3) 引張領域 II

引張領域 II は、アンカーボルト 1 列 (2 本、もしくは 3 本) のみで抵抗した場合は、降伏してしまうが、アンカーボルト 2 列 (5 本) で抵抗した場合は、降伏せずに抵抗で

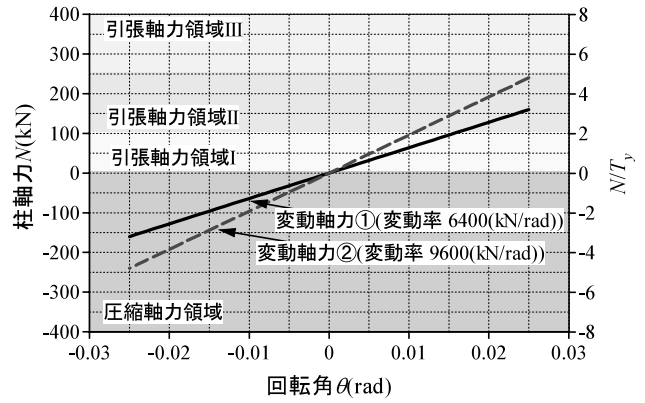


図2 軸力領域と軸力の関係

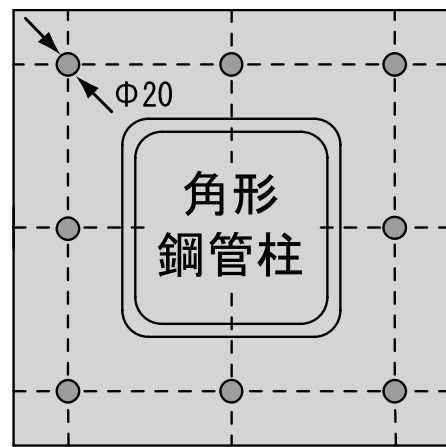


図3 ベースプレート詳細図

きる範囲 ( $0.25 {}_{ab} N_y < N < 0.625 {}_{ab} N_y$ ) である。

##### (4) 引張領域 III

引張領域 III は、アンカーボルト 2 列 (5 本) で抵抗した場合は、降伏してしまうが、アンカーボルト 3 列 (8 本) で抵抗した場合は、降伏せずに抵抗できる範囲 ( $0.625 {}_{ab} N_y < N < {}_{ab} N_y$ ) である。

#### 3.2 作用させる軸力

作用させる軸力を、以下に示す。

##### (1) 変動率 6400(kN/rad)

この変動率は、昨年アンカーボルトを 2 列配置した場合に行った載荷実験と同じ変動率である。以下に、この変動率における軸力とベースプレート回転角との関係を表す式を示す。

$$N = 6400 \times \theta - 50 \quad \dots\dots\dots (6)$$

##### (2) 変動率 9600(kN/rad)

この変動率は、引張領域 I、および II にまたがる変動率である。以下に、この変動率における軸力とベースプレート回転角の関係を表す式を示す。

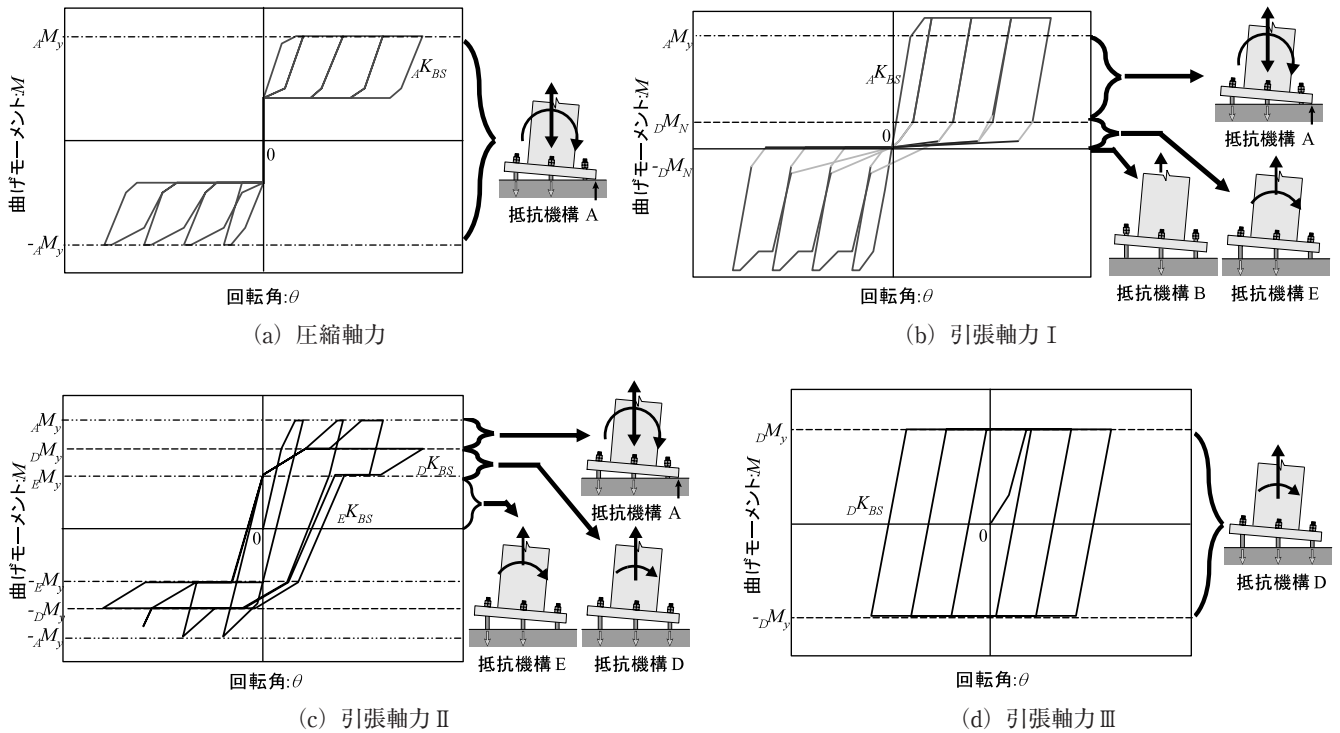


図4 一定軸力作用下における復元力特性モデル

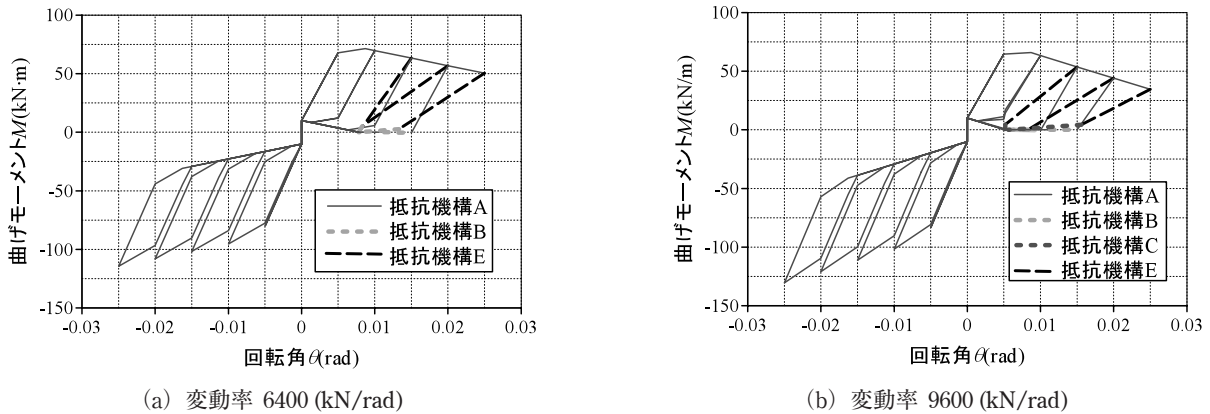


図5 変動軸力作用下における復元力特性モデル

$$N = 9600 \times \theta - 50 \dots\dots\dots (7)$$

4. 復元力特性モデル

復元力特性モデルを提案するにあたり、アンカーボルトの配置位置とベースプレートの詳細図を図3に示す。

復元力特性モデルは、提案する抵抗機構をもとに提案を行う。変動軸力作用下における復元力特性モデルは、昨年行った多数配列型露出柱脚の一定軸力作用下における実験結果、および復元力特性モデルをもとに提案を行う。

図4に各一定軸力下における復元力特性モデルを示す。また、図5に変動軸力作用下における復元力特性モデルを示す。

4.1 一定軸力

4.1.1 圧縮軸力領域 (Comp)

圧縮軸力 (Comp) 作用下における復元力特性モデルを図4(a)に示す。この軸力作用下では、常に抵抗機構 A となる。また、荷初期の段階では、柱軸力が曲げに対して抵抗するため、ベースプレートには回転が生じず、付加曲げ耐力まで耐力が上昇する。

4.1.2 引張軸力領域 (Ten I)

引張軸力 (Ten I) 作用下における復元力特性モデルを図4(b)に示す。この軸力作用下では、引張軸力による影響があるため、ベースプレートと基礎は接触と離間を繰り返す。また、1列のアンカーボルトで抵抗できるため、曲げモーメントの基点は、接触しているアンカーボルトのナ



ットとベースプレートの接触面となる。また、図4(b)に示す破線を境に抵抗機構が変化し、破線より下にある場合は、抵抗機構Eとなり、破線より上にある場合は、抵抗機構Aとなる。

#### 4.1.3 引張軸力領域 (Ten II)

引張軸力 (Ten II) 作用下における復元力特性モデルを図4(c)に示す。この軸力作用下では、軸力の影響が大きく、ベースプレートと基礎が接触と離間を繰り返す、曲げモーメントの基点となる点が、ベースプレート端部、中央列のアンカーボルトのナットとベースプレートの接触面、そして外側の列のアンカーボルトのナットとベースプレートの接触面の3点で様々に変化するため、復元力特性モデルはかなり複雑なものとなる。また、抵抗機構は、図4(c)に示す破線、および一点鎖線を境として、変化する。一点鎖線より下にある場合は、抵抗機構Eとなり、一点鎖線と破線の間にある場合は、抵抗機構Dとなり、そして破線より上にある場合は、抵抗機構Aとなる。

#### 4.1.4 引張軸力 (Ten III)

引張軸力 (Ten III) 作用下における復元力特性モデルを図4(d)に示す。この軸力作用下では、軸力が大きいため、常にベースプレートと基礎が離間し、全てのアンカーボルトのナットとベースプレートが接触している。そのため、抵抗機構は常に、抵抗機構Dとなり、曲げモーメントの起点は、圧縮側アンカーボルトのナットとベースプレートの接触面となるので、復元力特性モデルは、完全弾塑性型となる。

### 4.2 変動軸力

#### 4.2.1 変動率 6400(kN/rad)

変動率6400 (kN/rad)の軸力作用下に復元力特性モデルを図5(a)に示す。

変動軸力の場合でも、圧縮領域、つまり負方向載荷であれば、常に抵抗機構Aとなるため、抵抗機構Aの評価式により求めることができる。また、正方向載荷の場合でも軸力が圧縮軸力の領域から引張軸力の領域へと変化する0.0078 (rad)までは、抵抗機構Aの評価式により評価することができる。その回転角以降でも、2, 3, 4サイクル目においては、引張軸力の領域に入るまでに、中央列と引張側のアンカーボルトのナットとベースプレートが接触するため、引張軸力が増加してもベースプレートと基礎が接触しているため、抵抗機構Aのまま載荷が進む。しかしながら、最終サイクルでは、引張軸力の領域に入っても、アンカーボルトの伸びが大きいため、ベースプレートと基礎が離間すると共に、中央列のみのアンカーボルトのナットとベースプレートが接触し、抵抗するためベースプレートと基礎が接触するまでは、その接触面を中心としてベース

プレートが回転する。

除荷時においては、除荷を開始するとベースプレートと基礎が離間し、抵抗機構Eとなり、さらに除荷を進めると引張側のアンカーボルトのナットとベースプレートが離間し、抵抗機構Cとなる。そして、その後さらに除荷を進めると圧縮軸力の領域となり、抵抗機構Aに変化した後、原点に戻る。

#### 4.2.2 変動率 9600(kN/rad)

変動率9600 (kN/rad)の軸力作用下における復元力特性モデルを図5(b)に示す。

この変動率の場合でも、変動率6400 (kN/rad)の場合と同様に圧縮領域、つまり負方向載荷であれば、常に抵抗機構Aとなるため、抵抗機構Aの評価式により求めることができる。また、正方向載荷の場合でも軸力が圧縮軸力の領域から引張領域の領域へと変化する回転角0.0056 (rad)までは、抵抗機構Aの評価式により評価することができる。その回転角以降でも、2, 3サイクル目においては、引張軸力の領域に入るまでに、中央列と引張方のアンカーボルトのナットとベースプレートが接触しているため、ベースプレートと基礎が接触し、抵抗機構Aのまま載荷が進む。しかしながら、4サイクル目、および最終サイクルにおいては、引張軸力の領域に入っても、アンカーボルトの伸びが大きいため、ベースプレートと基礎が離間すると共に、中央列のアンカーボルトのナットとベースプレートが接触し、軸力に対して抵抗するためベースプレートと基礎が接触するまでは、その接触面を中心としてベースプレートが回転する。

除荷時においては、1, 2サイクルでは、ベースプレートと基礎が接触しているため、抵抗機構Aのまま除荷が進んでいく。3, 4, および最終サイクルにおいては除荷を開始するとベースプレートと基礎が離間し、抵抗機構Eとなり、さらに除荷を進めると引張側のアンカーボルトのナットとベースプレートが離間し、抵抗機構Bになり、さらに除荷を進めるとベースプレートと基礎が接触するとともに圧縮軸力の領域に入り、抵抗機構Aとなり原点に戻ると考えられる。しかし、3サイクル目では、抵抗機構Bとなる前に圧縮軸力の領域に入ってしまうため、圧縮軸力が作用することにより、抵抗機構Aになり原点に戻ると考えられる。

## 5. 考察

2種類の変動軸力作用下における復元力特性モデルの提案を行い、以下の考察を得た。

- 1) 正方向載荷の場合では、圧縮軸力の減少、および引張軸力が発生するため、降伏耐力が減少し、負方向載荷

の場合は、圧縮軸力が増加するため、降伏耐力は上昇する。

- 2) 変動軸力作用下でも、それぞれの領域において、ベースプレートと基礎との接触・離間関係とアンカーボルトのナットとベースプレートの接触・離間関係を考慮し、提案した抵抗機構をあてはめ、評価式を使用することにより評価できると考えられる。
- 3) アンカーボルトの伸びにより、スリップ現象を起こす領域が現れ、その領域で引張軸力が発生するとベースプレートと基礎が離間すると共に、アンカーボルトのナットとベースプレートとの接触・離間関係より抵抗機構が変化すると考えられる。

今後、同じ条件下での載荷実験を行うことにより、実験結果と本論文で提案した復元力特性モデルとの比較を行うことにより、対応しているか、そして更に詳細なモデルの提案が必要であると考えられる。また、昨年度行った、アンカーボルトを隅角部に4本配置した場合の露出柱脚の変動軸力作用下における載荷実験において、本研究室で開発している楔デバイスを使用したノンスリップ型露出柱脚では、スリップ型露出柱脚に比べ、復元力特性モデルの単純化ができたという結論をえているので、多数配列型においても適応できるかの確認も行う必要があると考えられる。

## 謝 辞

本論文は、広島工業大学「高性能構造システム開発研究

センター」(代表者：高松 隆夫教授)のプロジェクトの一環として実施しました。ここに記して、感謝の意を表します。

## 参考文献

1. 田中秀宣, 亀元靖彦, 三谷勲, 藤永隆, 伊藤倫夫: 変動軸力を受ける露出柱脚の曲げ挙動と復元力特性, 鋼構造論文集, 第10巻第39号, pp.39-49, 2003.9
2. 田沼吉伸, 橋本健一: 引張軸力を受ける露出形式柱脚の終局挙動, 鋼構造年次論文方向句集, 第6巻, pp.181-188, 1998.11
3. 宗宮由典, 福地保長, 陳文慶: 変動軸力を受ける露出型柱脚の弾塑性挙動及び耐力評価に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.562, pp.137-143, 2002.12
4. 玉井宏章: 変動軸力と繰り返し曲げを受ける露出柱脚の載荷実験, 日本建築学会構造系論文集, 第567号, 149-156, 2003.5
5. 九谷和秀, 増田貫志: 鉄骨構造露出形式の終局耐力に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第433号, 1992.3
6. 高松隆夫, 銅木弘和, 中村慎太郎: 改良型復元力特性を有する鉄骨露出柱脚に関する研究, 鋼構造年次論文
7. 伊藤倫夫, 三谷勲, 大谷恭弘, 藤永隆, 田中秀宣: 基礎部の配筋を簡略化したアンボンド型アンカーボルトを用いた露出柱脚の構造性能, 鋼構造論文集, 第8巻第31号, pp.43-55, (2001.9)